Les menaces venant de l'espace

Contzen, Jean-Pierre

VISIT...

LANZAROTE Caliente.COM

JEAN-PIERRE CONTZEN

LES MENACES VENANT DE L'ESPACE

Préface de Jean-Noël Missa

ebooks

ACADÉMIE ROYALE DE BELGIQUE
Collection L'ACADÉMIE EN POCHE

LES MENACES VENANT DE L'ESPACE

Jean-Pierre Contzen

Les menaces venant de l'espace
Les exoplanètes.

Préface de Jean-Noël Missa

ACADÉMIE ROYALE DE BELGIQUE
Éditions L'ACADÉMIE EN POCHE



ACADÉMIE ROYALE
des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts
DE BELGIQUE

Académie royale de Belgique
rue Ducale, 1 - 1000 Bruxelles, Belgique
www.academieroyale.be

Informations concernant la version numérique
ISBN : 978-2-8031-0396-6

© 2014, Académie royale de Belgique

Collection L'Académie en poche
Sous la responsabilité académique de Véronique Dehant
Volume 32

Diffusion
Académie royale de Belgique
www.academie-editions.be

Crédits
Conception et réalisation : Grégory Van Aelbrouck, Laurent Hansen, Académie royale de Belgique

Illustration de couverture : Montage, Académie royale de Belgique

Publié en collaboration avec

Collège
Belgique
Lieu de Savoir



Bebooks - Editions numériques

Quai Bonaparte, 1 (boîte 11) - 4020 Liège (Belgique)

info@bebooks.be

www.bebooks.be

Informations concernant la version numérique

ISBN 978-2-87569-134-7

A propos

Bebooks est une maison d'édition contemporaine, intégrant l'ensemble des supports et canaux dans ses projets éditoriaux. Exclusivement numérique, elle propose des ouvrages pour la plupart des liseuses, ainsi que des versions imprimées à la demande.

Préface

Depuis le début de l'ère nucléaire et la prise de conscience de la crise écologique, le risque est une des préoccupations majeures des populations inquiètes des dangers inhérents au développement. D'où l'essor des sciences du risque pour identifier et, si possible, gérer le risque. Au sens technique, la notion de risque associe deux concepts — celui de danger et celui de probabilité — et renvoie à un processus complexe d'analyse et de quantification toujours caractérisé par l'incertitude. Étymologiquement, le mot risque semble provenir du vocabulaire maritime, du latin *resecare* (couper) et du bas latin *resecum* (écueil). On pense au bateau qui se brise sur un rocher. Mais c'est aux risques venus du ciel que s'intéresse Jean-Pierre Contzen dans ce court mais dense ouvrage. Dans l'histoire, beaucoup d'objets célestes se sont écrasés sur Terre. En fait, ce phénomène se produit fréquemment, généralement sans grandes conséquences. Ces risques constituent le thème central de films catastrophe et alimentent les théories apocalyptiques. Les météorites se rappellent régulièrement à notre bon souvenir, comme ils l'ont fait récemment à Chelyabinsk, en Russie. Cet incident a fait revoir à la hausse le risque posé par ces rochers venus de l'espace.

Les météorites ne sont pas les seuls dangers venant du ciel. À l'heure actuelle, trois menaces originaires de l'espace sont à prendre en compte : celle des météorites, celle des tempêtes solaires et celle des débris spatiaux, une menace créée par l'homme depuis le lancement de Spoutnik en octobre 1957. Si l'homme décidait de se lancer dans le contrôle du climat, s'ajouterait une quatrième source de risques, celle de la manipulation de l'atmosphère, la géo-ingénierie. Le concept de géo-ingénierie dérive du souci de contrer le réchauffement de la planète en utilisant des moyens technologiques pour modifier les facteurs gouvernant le climat.

Le niveau objectif de risque (probabilité et ampleur de l'effet sur notre Terre) est différent d'une menace à l'autre, sa perception est changeante et les possibilités de prévention varient elles aussi. Au sommet de l'échelle du risque se situe le « risque existentiel » que le philosophe Nick Bostrom définit comme étant un danger qui menace la planète tout entière, et qui aurait pour conséquence « soit une destruction totale de toute vie intelligente sur Terre, soit une paralysie permanente de son potentiel de développement ». Dans le cadre global

de l'analyse du risque, on distingue deux moments, celui de l'évaluation du risque (*risk assessment*) et celui de la gestion du risque (*risk management*). L'évaluation du risque se veut une démarche scientifique, rigoureuse, objective à l'abri des controverses sociales. La gestion du risque se situe du côté de la décision et se présente donc comme un champ ouvert à la dimension sociale.

Jean-Pierre Contzen esquisse de manière claire et convaincante le type de stratégies à adopter pour les différents dangers émanant de l'espace. Les réponses impliquent quatre processus : la surveillance, la modélisation, la prévention et la remédiation. Par exemple, dans le cas des météorites, il s'agit de renforcer le réseau de surveillance des corps célestes grâce à des télescopes au sol ou dans l'espace, à élaborer des modèles mécaniques dynamiques pour prévoir la trajectoire et à développer des stratégies technologiques pour éviter ou minimiser l'impact. Pour être efficace, il importe que le corps céleste soit détecté le plus tôt possible. Le système ATLAS de l'Université d'Hawaï qui devrait être opérationnel fin 2015 garantira une alerte de 3 semaines pour un objet de 135 m de largeur (le « destructeur de pays ») et de 1 semaine pour un astéroïde de 45 m de largeur (le « destructeur de ville »). Pour l'auteur, la bonne recette relative à la gouvernance du risque allie le développement de nouvelles technologies au renforcement des structures institutionnelles, comptant sur une sagesse des Nations basée elle-même sur une perception informée des risques. Remercions Jean-Pierre Contzen d'offrir au lecteur un outil précieux pour une meilleure compréhension de la gestion des risques émanant de l'espace.

Jean-Noël Missa,
Membre de l'Académie

Introduction

Le Persan Muḥammad ibn Mūsā al-Khwārizmī (ca. 780 – ca. 850 a.d.), père de l'algorithme en mathématiques, a écrit :

> Les savants des temps passés et des nations révolues n'ont cessé de composer des livres. Ils l'ont fait pour léguer leur savoir à ceux qui les suivent. Ainsi demeurera vive la quête de la vérité.

Cet ouvrage ne prétend pas bouleverser la démarche scientifique mais cherche plutôt à stimuler la quête de la vérité. Nos ancêtres les Gaulois ne craignaient rien sauf que le ciel ne leur tombe sur la tête. Cette crainte est-elle encore fondée ? Les habitants de Chelyabinsk répondront sans doute positivement à cette question mais qu'en est-il vraiment ? Le propos n'est pas seulement d'identifier les différents types de menaces venant de l'Espace et d'en analyser brièvement les aspects scientifiques mais aussi d'esquisser les réponses technologiques qui peuvent y être apportées. Il sera montré que, dans tous les cas, ces menaces agissent, certes à des degrés divers, en puissant moteur de nouveaux développements technologiques. Notre Société est-elle prête à en payer le prix ? Pour ce faire, est-elle vraiment consciente de la nature et de l'importance relative des dangers encourus ? Sans verser dans le catastrophisme ou faire preuve d'un optimisme béat, l'ouvrage tente d'ébaucher une réponse à de telles questions en abordant la problématique de la gouvernance du risque, mais sa véritable ambition reste de donner envie d'en savoir plus sur les sujets abordés.

Quelles Menaces ?

En ce début du XXI^e^ siècle, il existe trois menaces à prendre en compte :

- Les *météorites*, un phénomène naturel très ancien mais d'actualité récente
- Les *tempêtes solaires*, un autre phénomène naturel, étudié à partir du milieu du XIX^e^ siècle
- Les *débris spatiaux*, une menace créée par l'homme depuis le lancement de Spoutnik en octobre 1957

Si l'homme décidait de se lancer dans le contrôle du climat, s'ajouterait une quatrième problématique, celle de la manipulation de

l'atmosphère, la *géo-ingénierie*. Dans ce dernier cas, l'évolution dépendra plus du jugement de la Société que de l'apport de nouvelles technologies.

Les menaces engendrent des risques si les systèmes menacés, économiques ou sociétaux, présentent des vulnérabilités ; c'est, hélas, le cas de notre très vulnérable planète. Le risque engendré est le produit du préjudice humain ou matériel encouru par sa probabilité d'occurrence. Le niveau objectif de risque est différent d'une menace à l'autre, sa perception est changeante et les possibilités de prévention et/ou d'atténuation varient elles aussi. Les différents chapitres esquisseront le type de réponse à adopter dans ces différents cas, les mots clés étant surveiller, modéliser, prévenir et remédier. La bonne recette allie le développement (sans excès) de nouvelles technologies au renforcement des structures institutionnelles, comptant sur une sagesse des Nations basée elle-même sur une juste perception des choses.

Chapitre 1

Les météorites : une menace éternelle

De quoi s'agit-il ?

La menace d'impact de notre planète par des astéroïdes existe depuis toujours ; ces corps solides naturels d'origine inter- ou extra-solaire donnent naissance lors de la rentrée dans l'atmosphère terrestre à des météores dont les fragments touchant la terre sont connus sous le nom de météorites. Il y a environ 4 milliards d'années, la Terre subit un bombardement intense (*The Late Heavy Bombardment*) dû sans doute à une inversion des orbites de Neptune et Uranus. Notre planète porte les traces de ce phénomène en dépit de la protection significative offerte par son atmosphère et depuis lors, d'autres impacts significatifs se sont produits. Le Lunar and Planetary Laboratory de l'Université d'Arizona estime qu'il y a eu, dans l'histoire de la Terre, 3 millions de cratères terrestres de plus de 1 km de diamètre, plus de 170 demeurant après les changements géologiques de notre planète. Une carte du monde et la photo qui suivent, illustrent ce point **(fig. 1 et 2)**.

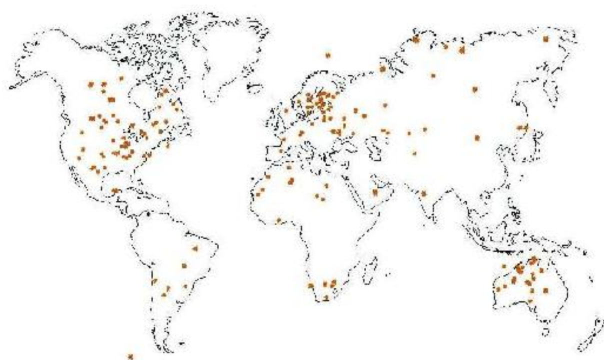


fig. 1 — Carte du monde, avec les 172 cratères les plus importants

Source : Lunar and Planetary Laboratory



fig. 2 — Meteor Crater, en Arizona (États-Unis)

Photo : Mouser William

Le risque encouru dépend essentiellement de la taille de l'objet céleste, le « géo-croiseur », qui se trouve sur une trajectoire de collision avec notre planète, la vitesse d'impact potentiel étant toujours très élevée, de 11,2 km/s à 72 km/s. Le niveau de risque est détaillé dans le tableau ci-dessous **(tab. 1)**.

Dimension de l'astéroïde	Énergie dégagée lors de la réentrée	Fréquence	Impact
Inférieure à 10 m	Dans la gamme des kT de TNT	578 rentrées dans haute atmosphère observées entre 1972 et 2000	En très grande majorité, astéroïdes détruits dans l'atmosphère
Entre 10 et 100 m	De l'ordre de 10 MT pour un diamètre de 50 m	Une fois tous les quelques siècles	Onde de choc de forte intensité (Tunguska 1908), cratère > 1 km (Meteor Crater, 50 000 ans), raz de marée avec vagues de plus de 100 m
Supérieure à 100 m	Du million au milliard de MT (pour 10 km de diamètre et vitesse de 20 km/s, 1 milliard de MT)	Une collision par 10 à 100 millions d'années	Cratère > 100 km, matériau incandescent projeté sur toute la planète, « hiver nucléaire »

tab. 1 — Le risque engendré par les astéroïdes

Comment peut-on déterminer la menace constituée par un « géo-croiseur » ? L'observation astronomique fournit la réponse. Les deux grandes organisations spatiales ESA et NASA supportent deux équipes qui se coordonnent, l'une à Pise et Rome associée au système NEODyS, l'autre au *Jet Propulsion Laboratory* du *California Institute of Technology* associée au système SENTRY. Ces systèmes en se basant de façon constante sur l'observation, calculent les trajectoires des astéroïdes susceptibles d'entrer en collision avec la Terre et en définissent les propriétés, ce qui permet d'établir des listes de risques. Ces listes sont constamment mises à jour en fonction d'une meilleure connaissance des orbites des astéroïdes, d'une amélioration des modèles pour réduire les erreurs astrométriques ; l'élimination d'un objet céleste des listes ne signifie pas qu'il y a eu erreur, simplement que la connaissance des géo-croiseurs potentiellement menaçants s'est améliorée. La figure de la page suivant **(fig. 3)** montre la croissance du nombre de géo-croiseurs détectés ; leur nombre dans l'Univers n'évolue pas sensiblement, c'est la mise en place de réseaux d'observation de plus en plus perfectionnés qui explique cette

croissance.

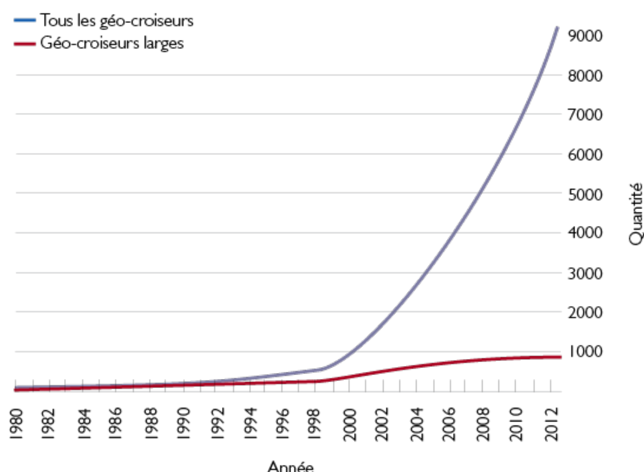


fig. 3 — Évolution du nombre de géo-croiseurs détectés (janvier 1980 – août 2012)

D'après : Alan B. Chamberlin (JPL) - 15 oct. 2012

Le cas de l'astéroïde 99942 Apophis en est une illustration : l'attention s'est longtemps concentrée sur la menace d'une collision majeure créée par ce géo-croiseur de taille respectable (210 m par 330 m) pouvant impacter notre planète le 13 avril 2029. De nouvelles observations indiquent, après de nouveaux calculs, qu'Apophis devrait bien passer à cette date à 38 353 km de la Terre. La probabilité d'impact est nulle vu que l'incertitude sur la distance est établie à moins de 10 km mais le géo-croiseur pourrait bénéficier de l'effet de la gravitation terrestre pour modifier sa trajectoire et en faire une trajectoire de véritable collision avec la Terre le 13 avril 2036. Seules des observations menées après le passage du 13 avril 2029 pourront confirmer ou infirmer cette hypothèse. Les dernières données de NEODyS donnent une probabilité d'impact en 2036 inférieure à 10 exp-6 ; pour l'apparition suivante d'Apophis dans les abords de la Terre en 2068, la probabilité telle que calculée actuellement est nettement plus importante puisqu'elle s'élève à plus de 5 10 exp-4.

L'astéroïde qui s'est désintégré dans le ciel de Chelyabinsk en Sibérie occidentale le 13 février 2013 a suscité beaucoup d'attention médiatique et a donné lieu à de nouvelles études scientifiques **(fig. 4)**. Peu important en taille au départ (19 m dans sa plus grande

dimension), avec une vitesse de réentrée moyenne (19 km/s), il s'est fragmenté en morceaux plus petits entre 30 et 45 km d'altitude, provoquant une boule de feu ayant relâché une énergie équivalente à 500 kilotonnes de TNT, ne laissant, comme plus important fragment qu'une météorite de l'ordre de 600 kg et de dimensions modestes ayant fini dans un lac, limitant ainsi le dommage aux personnes et aux biens.



fig. 4 — Météorite récupérée près de Chelyabinsk

Photo : Alexander Firsov

Pourquoi cet astéroïde n'a-t-il pas été détecté avant sa réentrée ? L'explication fournie actuellement par les scientifiques est que l'astéroïde avait passé les six semaines précédant cette réentrée dans une zone du ciel non visible par les télescopes terrestres. De plus, avant cette période, l'objet était trop petit pour être détecté à partir du sol et le réseau spatial est encore trop fragmentaire. L'incident de Chelyabinsk a montré que la menace générée par de petits astéroïdes avait été sans doute sous-estimée ; les observations télescopiques ont mis à jour environ 500 objets de la taille de celui de Chelyabinsk (10 à 20 m) mais la population de tels astéroïdes pourrait être plus importante.

À l'heure actuelle, la NASA estime à 1 400 le nombre d'astéroïdes potentiellement dangereux.

QUE PEUT-ON FAIRE ?

Comme l'a indiqué le paragraphe précédent, la première mesure à

prendre est de renforcer le réseau de surveillance des corps célestes tant au sol – notamment avec les radiotélescopes tels que celui d'Arecibo (305 m de diamètre) ou ceux du réseau DSN de la NASA, un réseau qui vient de fêter en décembre 1963 ses 50 ans d'existence –, que dans l'espace, le télescope spatial que la Fondation B612 compte construire avec des fonds privés en étant un exemple, le satellite WISE de la NASA en étant un autre. Ce dernier satellite permet la détection des corps célestes dans la gamme infra-rouge, ce qui a amélioré significativement la détermination de leur taille et a dès à présent bouleversé les classifications produites avant son lancement ; la surveillance a ainsi connu une grande expansion dans la dernière décennie, comme le montre le diagramme suivant. Le problème demeure néanmoins celui des corps identifiés tardivement. Le système ATLAS de l'Université d'Hawaï, qui devrait être opérationnel fin 2015, garantirait une alerte de 3 semaines pour un objet de 135 m de largeur (le « destructeur de pays ») et de 1 semaine pour un astéroïde de 45 m de largeur (le « destructeur de ville »). L'astéroïde de Tunguska qui s'est désintégré dans le ciel de Sibérie en juin 1908, détruisant 2000 km^2 de forêts, est l'événement le plus récent dans cette dernière catégorie.

La deuxième mesure est d'améliorer les modèles dynamiques, encore trop approximatifs, et réduire ainsi les erreurs de prévision. C'est le travail des astronomes et des spécialistes de mécanique céleste.

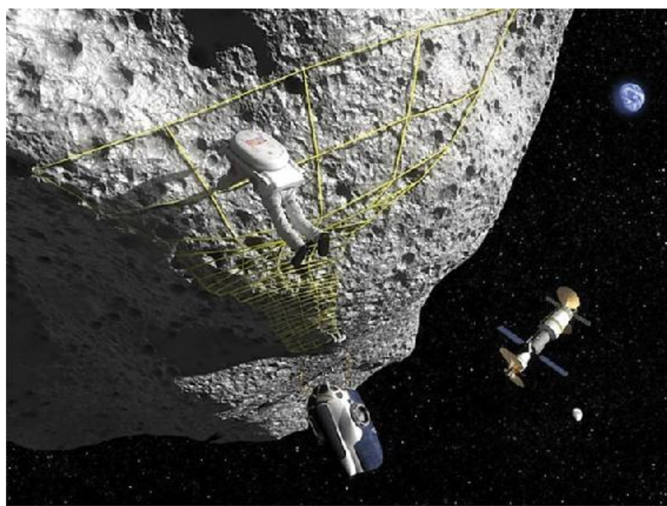


fig. 5 — Déviation d'un astéroïde

Crédit : NASA/JPL

Reste la troisième mesure, celle de l'étude et du développement de scénarios de correction de trajectoire du géo-croiseur. La solution de faire exploser purement et simplement l'objet céleste est la plus médiatique mais aussi la plus risquée, étant donné que les débris issus de l'explosion poursuivraient probablement la même trajectoire de collision avec la Terre que l'objet d'origine. Parmi les scénarios débattus pour modifier la dynamique du géo-croiseur, on peut considérer les solutions suivantes :

- Vaporiser la surface de l'astéroïde avec un rayon laser de grande puissance à partir du sol ou avec un concentrateur solaire depuis l'espace ;
- Exploser une bombe à neutrons dont l'intense bouffée de particules dévierait le géo-croiseur sans le fragmenter ;
- Changer l'absorption du rayonnement solaire par la surface de l'astéroïde. L'étude a montré qu'un changement de 0,5 % de cette absorption suffirait dans le cas d'Apophis, ceci pouvant être réalisé en peignant au bon endroit, d'une couleur blanche (couleur peu absorbante) une surface de 40 km sur 40 km. Ceci nécessiterait un rendez-vous avec intervention d'un astronaute, la peinture elle-même ne représentant qu'une charge utile de 8 kg ;
- Attacher une grande voile solaire qui lentement dévierait le géo-croiseur de sa trajectoire initiale **(fig. 5)** ;
- Adjoindre de façon mécanique à l'astéroïde un tracteur gravitationnel (une fusée) qui en modifierait la trajectoire suivant le mode désiré **(fig. 6)** ;
- Provoquer un choc d'impact qui affecterait la trajectoire de l'astéroïde. Pour tester cette dernière méthode, l'Agence Spatiale Européenne a envisagé la mission Don Quijote comportant deux satellites : SANCHO, mis en orbite autour d'un astéroïde de grande taille, évaluerait les caractéristiques de ce dernier, les relaierait aux contrôleurs au sol et ensuite observerait la collision avec le deuxième satellite, HIDALGO, qui, ayant suivi une route totalement différente, impacterait de façon autonome le corps céleste à une vitesse proche de 10 km/s. Il s'agirait de démontrer et valider une technologie qui pourrait, si nécessaire, être utilisée pour dévier un astéroïde menaçant la Terre ;
- Finalement, capturer l'astéroïde et l'amener sur une orbite sûre, l'orbite lunaire étant la plus souvent citée. Les astéroïdes peuvent contenir des minéraux de valeur susceptibles d'être utilisés dans l'industrie, aussi d'aucuns envisagent-ils même leur exploitation minière une fois amenés en orbite lunaire. Le

Président Obama a lancé une initiative dans ce sens en 2010 et la NASA a inscrit la mission à son programme d'exploration spatiale avec 2025 comme objectif. Il s'agit de mettre au point un « lasso spatial » qui permettrait de capturer un astéroïde de faible taille (7 mètres de diamètre) et de l'amener en orbite lunaire où des astronautes en effectueraient l'inspection. Le « lasso spatial » envisagé est un système de propulsion solaire-électrique mettant 6 ans pour atteindre l'astéroïde et ensuite de 2 à 6 ans pour le ramener sur une orbite stable permettant à un véhicule habité du type ORION de s'en approcher **(fig. 7 et 8)** ;



fig. 6 — Projet du tracteur gravitationnel du DLR

Crédit : NASA/SPL

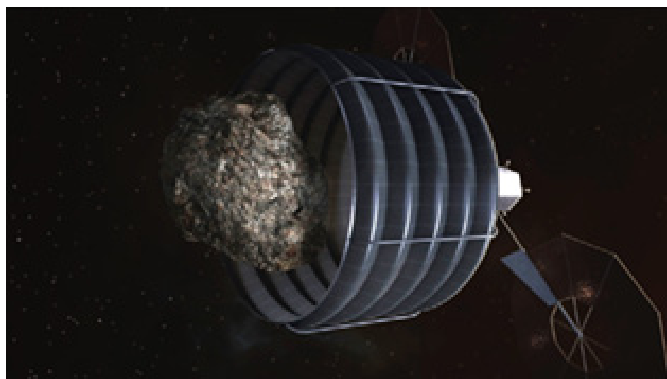


fig. 7 — Lasso spatial imaginé par la NASA

Crédit : NASA/JPL



fig. 8 — Simulation de l'arrimage d'un astéroïde au lasso spatial.

Crédit : NASA/JPL

Dans toutes ces solutions, le facteur temps est essentiel. Comme le dernier cas le montre, certaines des options décrites requièrent même plusieurs dizaines d'années de planification.

Sur le plan juridique, vu le caractère mondial de n'importe quelle opération menée, il faudra sans doute prévoir un Traité au niveau des Nations unies pour disposer des outils politiques nécessaires à une action coordonnée éventuelle. Comme première étape, en octobre

2013, l'Assemblée générale des Nations unies a décidé de mettre sur pied un Groupe international d'Alerte aux Astéroïdes afin que les États membres s'échangent l'information sur les objets potentiellement dangereux. En cas de détection d'un objet réellement menaçant, le COPUOS, le Comité des Nations unies pour l'Utilisation pacifique de l'Espace extra-terrestre, coordonnerait une mission pour dévier la trajectoire ou capturer l'objet menaçant, aucune agence spatiale n'ayant la responsabilité explicite d'agir seule. Le projet de la NASA de capturer un astéroïde avait d'ailleurs soulevé certaines interrogations quant à la légalité d'une telle opération au regard du Traité des Nations unies sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique. Il est apparu toutefois que, tant qu'un autre État ne cherchait pas à atteindre le même astéroïde que les États-Unis, il y avait compatibilité avec le cadre juridique des Nations unies.

La gouvernance du risque

A-t-on raison de se préoccuper d'un tel risque ; faut-il faire jouer à cet égard le Principe de Précaution ? Nick Borstrom de l'*Oxford Martin School* a établi dans le tableau qui suit une classification du risque encouru par l'être humain.

Dans la classification de Borstrom pour les astéroïdes les plus grands, il s'agit d'un « risque existentiel » trans-générationnel.

Même pour des astéroïdes plus petits, le risque de causer un dommage au niveau de la Société croît avec la démographie et l'urbanisation (problème de l'évacuation).

Le risque encouru dépend essentiellement de la taille de l'objet céleste, le « géo-croiseur », qui se trouve sur une trajectoire de collision avec notre planète, la vitesse d'impact potentiel étant toujours très élevée, de 11,2 km/s à 72 km/s. Le niveau de risque est détaillé dans le tableau ci-dessous **(tab. 1)**.

	Imperceptible	Supportable	Ecrasant
Personnel	Perte d'un cheveu	Vol de voiture	Accident mortel
Local	Un véhicule de plus dans un embouteillage	Récession économique	Vieillissement
Mondial	Réchauffement de 0,01°C	Destruction de la couche d'ozone	Génocide
Trans-générationnel	Disparition d'une espèce	Chute de la biodiversité	« Risque existentiel »

tab. 2 — La classification du risque, par Nick Borstrom

L'intensité du dommage causé est extrêmement élevée, mais la probabilité est très faible. Les probabilités données dans la littérature indiquent des valeurs très faibles, parfois interpellant l'esprit : un impact majeur provoqué par un objet de plus de 10 m devrait se produire une fois tous les 100 millions d'années, tout en notant que la fréquence ainsi estimée pour de tels événements ne constitue en aucun cas une indication spécifique du moment où ces événements devraient se répéter.

Comment quantifier, dans de telles conditions, le risque encouru ? Au niveau de probabilité extrêmement minime qui prévaut ici, peut-on encore évaluer le risque avec les modèles utilisés pour les phénomènes généralement traités, aux conséquences certes sévères mais limitées et aux probabilités certes faibles mais compréhensibles ? Vraisemblablement non, une connaissance basée sur une combinaison de l'expérience passée, de l'observation astronomique et de la modélisation des phénomènes, sans cesse renouvelée et améliorée, doit permettre une estimation de la menace encourue.

Cette estimation est d'autant plus complexe qu'il faut tenir compte de la menace telle qu'elle est perçue par l'individu plutôt que la menace objective telle qu'elle est déterminée à un moment donné par l'approche scientifique. L'acceptabilité de la menace, facteur essentiellement lié à la subjectivité humaine, joue un rôle prédominant. On y retrouve plusieurs facteurs présents à divers degrés : fatalisme « I don't think that the human race will survive the next thousand years » (Stephen Hawking), résignation, égoïsme dû à

l'éloignement géographique « Cela n'arrive qu'aux autres! », incompréhension due à l'existence d'une indétermination fondamentale sur les menaces à très faible niveau de probabilité, ignorance des conséquences réelles de la menace, conflit avec des intérêts souverains, éloignement dans le temps, perception plus limitée des menaces naturelles que celle des menaces créées par l'homme. Pour ce dernier facteur, il faut bien constater que la perception du risque d'être tué par une météorite (1,4 10 exp-6) n'est pas la même que celle de finir dans sa baignoire (1,46 10 exp-6), tué par la foudre (1 10 exp-7) ou de mourir dans un accident de chemin de fer (2 10 exp-6). Le facteur de l'éloignement dans le temps est présent dans beaucoup de comportements humains, pas seulement dans l'évaluation de la menace des astéroïdes : l'être humain est prêt à agir et, si besoin, à payer pour éviter une menace qui affecterait ses enfants et petits-enfants mais il est beaucoup plus hésitant s'il s'agit de sa descendance qui vivra au XXII^e siècle, préférant réserver son énergie et ses ressources pour des problèmes plus immédiats. Cet éloignement dans le temps, combiné pour d'aucuns, à la conviction que la technologie aura suffisamment progressé pour éloigner la menace en temps utile, joue certainement un rôle dans le cas présent. L'enthousiasme mitigé du grand public européen se manifeste à travers un sondage réalisé par *Euronews* le 24 février 2013 avec la question : « Pensez-vous que les gouvernements devraient investir des budgets dans la protection contre les météorites ? » Le résultat en fut OUI : 44 % contre NON : 51 % et 5 % d'indécis.

Une enquête menée aux États-Unis du 4 au 6 février 2013 montre que, parmi les missions spatiales à définir, en dépit de l'initiative du Président Obama donnant le « lasso spatial » comme programme de grande envergure à la NASA, la déviation des astéroïdes est bonne dernière dans les priorités des citoyens américains. Ceci confirme un rapport du *National Research Council* consacré aux objectifs stratégiques de la NASA. L'argument du développement de nouvelles technologies destinées à parer la menace, mais utilisables également dans d'autres domaines, par exemple pour faciliter une mission habitée vers Mars, devrait rallier une plus grande partie de l'opinion publique américaine à une action liée aux astéroïdes ; il n'en est rien.

chapitre 2

Les tempêtes solaires – *Space Weather* : une menace exacerbée par la technologie

De quoi s'agit-il ?

L'activité du Soleil a toujours eu un impact sur notre planète, mais c'est avec l'apparition de systèmes basés sur des technologies sans cesse plus complexes que le phénomène a pris une nouvelle dimension en tant que menace. L'activité à la surface du Soleil obéit à un cycle de 11 ans ; elle se traduit par des éruptions de très grande intensité projetant des jets de matière ionisée à des centaines de milliers de km d'altitude **(fig. 9 et 10)**.

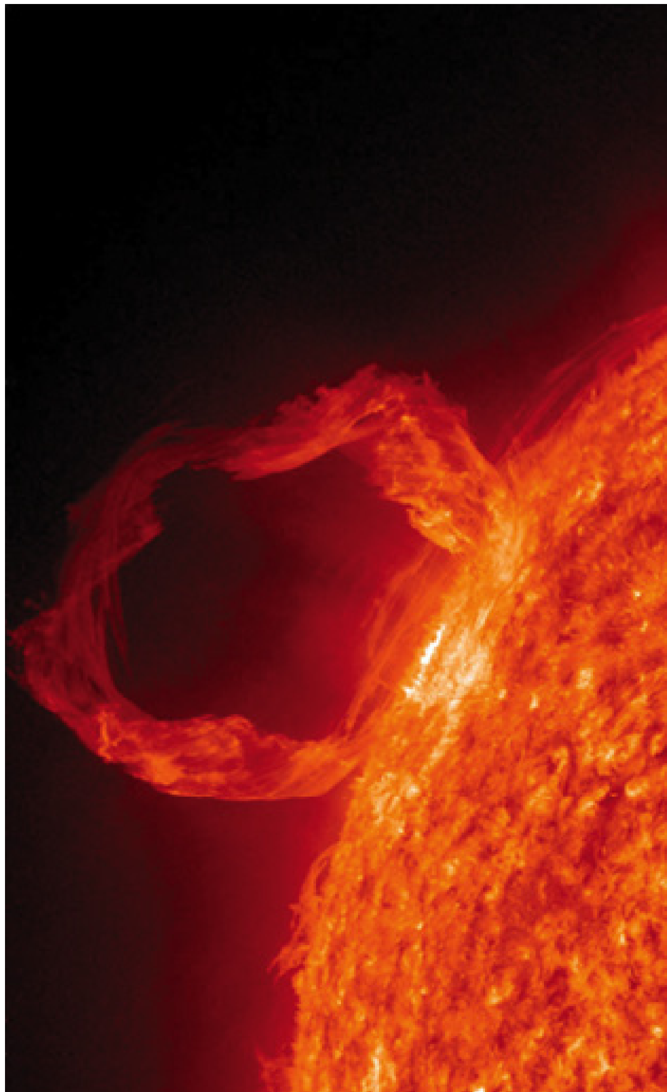


fig. 9 — Une éruption solaire.

Crédit : NASA

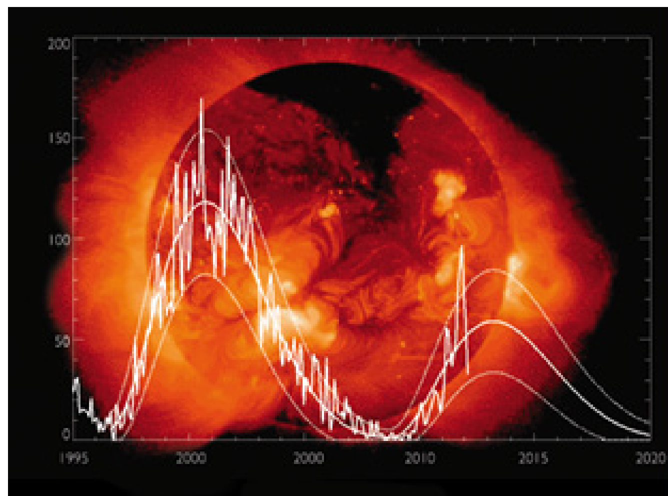


fig. 10 — Cycle solaire

Crédit : Hathaway/NASA/MSFC

Le maximum solaire, correspondant à l’intensité extrême de l’émission solaire au cours de chaque cycle, devait se situer pour le cycle le plus récent en 2013 ; il était prévu de grande importance et de ce fait redouté. Or rien de bien menaçant ne s’est vérifié à ce jour ; ceci montre toute la difficulté à prédire de façon sûre et détaillée l’activité solaire, mais est aussi révélateur de la tendance au catastrophisme prévalant à l’heure actuelle dans notre Société. La réalité est fort complexe, les cycles solaires sont loin d’être parfaitement réguliers en amplitude et les deux derniers maxima solaires autour de 1989 et 2001 comportaient non pas un mais bien deux pics. Cela peut-il se répéter avec un deuxième pic en 2014 ? Rien n’est exclu.

Les événements les plus significatifs se sont produits en 1859 et 1921, suivis en importance par ceux de 1958, 1989 et 2003, mais une éruption majeure est toujours possible en dehors des maxima d’activité solaire. L’événement de 1859 porte le nom de l’astronome amateur Richard Carrington qui observa l’apparition d’une éruption solaire particulièrement violente fin août-début septembre 1859. En dehors de l’apparition d’aurores boréales à des latitudes très basses, telles que les Caraïbes dans l’hémisphère Nord et le Queensland australien dans l’hémisphère Sud, cette super-éruption mit à mal les systèmes télégraphiques de l’époque : chocs électriques ressentis par les opérateurs, arcs apparaissant sur les isolateurs des lignes, certains systèmes continuant à fonctionner avec les batteries d’alimentation déconnectées en raison de courants telluriques particulièrement

significatifs. C'est la mémoire d'un tel événement qui a déterminé le sentiment de menace que pourrait apporter une nouvelle super-éruption solaire.

Comment se manifeste une éruption solaire ? Trois effets sont à prendre en compte :

- L'émission d'un rayonnement X et UV. Il met environ 8 minutes pour atteindre la Terre ; le délai de réaction est extrêmement court ;
- L'émission de particules chargées. Elles mettent de 10 à 30 minutes pour atteindre la Terre ; le délai de réaction s'en trouve amélioré mais il reste encore très limité ;
- L'éjection de matière solaire connue sous le nom de CME (*Coronal Mass Ejection*) mettant de 18 à 96 heures à atteindre la Terre, un délai plus gérable. Cette éjection est très importante en termes de masse : l'éruption solaire du 14 avril 1994 a éjecté un milliard de tonnes de matière solaire.

Les conséquences dans leur ensemble dépendent de la conjonction des rotations du Soleil (25.6 à 36 jours) et de la Terre (24 heures). Si l'éruption se produit sur la face du Soleil opposée à ce moment-là à la Terre, l'effet sera nul ou minime ; l'analogie de l'arroseur rotatif installé dans certains jardins est parfaitement valable.

Si une variation du rayonnement solaire a un impact sur le climat de notre planète, un possible couplage entre éruption solaire et le temps à court terme qui règne à la surface de la Terre n'a pas été établi, même si certaines publications font état d'une relation entre activité solaire et formation des ouragans.

Par contre, cette surface et la proche atmosphère subissent d'autres conséquences parmi lesquelles il faut relever :

- *Les rayons X et UV* affectent les astronautes mais aussi les populations terriennes, les espèces animales et végétales, en particulier là où le trou d'ozone est le plus important comme en Terre de Feu (la couche d'ozone stratosphérique protège efficacement des rayons UV). Ils endommagent aussi les panneaux photovoltaïques et les composants électroniques des satellites et sondes planétaires ainsi que ceux des systèmes terrestres. Les rayons X intenses perturbent enfin les communications HF ;
- *Les particules chargées et la matière coronaire éjectée (CME)*, lorsqu'elles ne sont pas arrêtées par le bouclier magnétique terrestre dont le rôle de protection est très important, produisent des effets électromagnétiques dans l'atmosphère et

sur Terre, notamment l'apparition de forts courants telluriques, les régions polaires étant les plus affectées ;

Parmi les effets les plus notables, il faut relever:

- La dégradation significative du signal des satellites de navigation conduisant à des erreurs de positionnement de plusieurs dizaines de km ;
- L'interruption des télécommunications terrestres HF et satellitaires ;
- La dégradation des systèmes radar ;
- L'impact sur les systèmes de transmission électriques (risque de black-out, dégâts aux transformateurs) ;
- L'impact sur la corrosion des oléoducs et gazoducs par interruption ou dégradation de leur protection cathodique ;
- Mais aussi, de beaux spectacles d'aurores boréales.

Que peut-on faire ?

Trois axes principaux se dessinent :

- Améliorer les systèmes de surveillance, via un réseau mondial de satellites couplé à un observatoire solaire virtuel concentrant et interprétant toutes les données spatiales et terrestres. Son coût a été évalué entre 100 à 200 millions de dollars ; beaucoup d'éléments individuels existent à l'heure actuelle, c'est la coordination qui fait défaut
- Améliorer la modélisation de la prévision des éruptions solaires permettant d'avertir aussitôt que possible les autorités intéressées d'une éruption imminente. Par exemple, le *Center for Integrated Space Weather Modeling,* un centre mis sur pied par la *National Science Foundation* des États-Unis et regroupant 11 organisations, a développé un modèle opérationnel fournissant une alerte allant de 1 à 4 jours ; c'est encore peu mais cela peut certainement aider les opérateurs des systèmes sensibles ;
- Si les deux premiers axes nécessitent le recours à plus de science et de technologie, le troisième va quelque peu dans le sens contraire : il s'agit d'éviter un excès de sophistication technologique accroissant la vulnérabilité de certains systèmes, en particulier les systèmes de transmission électriques et les systèmes informatiques. Lors des Jeux Olympiques de Londres en 2012, vu la période de maximum solaire, un impact sur les systèmes informatiques complexes utilisés pour les Jeux fut craint mais cet impact ne s'est pas vérifié. Dans un pareil cas, le

souci de répondre à la menace solaire rejoint celui de contrer une menace d'une tout autre nature, les attaques cybernétiques. Dans tous les cas, il faut replacer l'homme au cœur de la responsabilité en matière de gestion de systèmes complexes. Ceci a été souligné fort judicieusement par l'Organisation internationale de l'Aviation civile, qui, lors de la Conférence de la Navigation aérienne de 2012, émit une recommandation applicable à bien des domaines de l'activité humaine: « Automate only to improve overall system and human performance, not just because the technology is available ». La simplicité ne conduit pas nécessairement à plus de vulnérabilité, bien au contraire. C'est le cas notamment pour les éruptions solaires.

La gouvernance du risque

En cas de super-éruption solaire, la plupart des infrastructures critiques risquent d'être affectées à des degrés divers. En juin 2013, une étude impliquant le Lloyd's de Londres a estimé à 2 600 milliards de dollars US le coût actuel d'un événement similaire à celui connu par Carrington en 1859. Par ailleurs, une étude de la *National Academy of Sciences* américaine parle de dégâts potentiels au réseau électrique des US prenant de 4 à 10 ans pour être complétement réparés, et cela à un coût qui pourrait dépasser les 1 000 milliards de dollars US, en se basant sur un coût de 5 000 à 10 000 $ par MWh perdu.

Selon certaines évaluations récentes, la probabilité de revivre une éruption solaire de l'importance de celle de 1859 dans cette décennie serait de 6 à 12 %, un chiffre certes non négligeable. Cela préoccupe-t-il pour autant la population de nos pays ? La réponse est probablement négative due essentiellement à un manque de perception du problème, renforcé par le fait de ne pas avoir vécu des événements particulièrement désagréables attribués aux tempêtes solaires, et, pour les plus conscients, par le fait que la menace est focalisée sur les latitudes plus élevées.

La perception est plus élevée auprès de certains constructeurs et opérateurs des systèmes potentiellement vulnérables. Le Principe de Précaution est-il pour autant appliqué à une telle menace ? Oui dans certains cas, mais avec beaucoup d'hésitations dans d'autres :

- Lors d'une menace de tempête solaire, certaines compagnies aériennes dévient leurs vols circumpolaires pour limiter les risques d'interruption des télécommunications. Ce fut le cas lors de l'éruption solaire du 6 mars 2012 ;

- Les populations de l'extrême hémisphère Sud tiennent compte des accroissements prévus du rayonnement dans leur zone lors de leurs déplacements ;
- La plupart des fabricants des satellite ne sont guère préoccupés, vu l'utilisation de composants résistant au rayonnement, accroissant ainsi la capacité de survie du segment spatial. La préoccupation est plutôt du côté des opérateurs, en particulier ceux exploitant des satellites de télécommunications, de positionnement et de météorologie ;
- Restent les opérateurs de systèmes informatiques distribués et de réseaux électriques. Pour ces derniers, comme pour les fabricants de satellites, la difficulté réside dans la détermination du niveau de gravité à prendre en compte, un événement de l'importance de 1859 ou de celui de 2003 ? Le même problème se pose lors de la construction de digues de protection : quelle hauteur de vague maximale utiliser ? De toute manière, un certain nombre de mesures sont prises ou envisagées par les détenteurs de réseaux électriques dans des pays tels que la Suède et le Royaume-Uni, en utilisant des transformateurs plus tolérants aux courants continus parasites, avec mise à la terre modifiée ou en modifiant la structure des réseaux avec une production plus répartie et des transferts plus limités, réduisant ainsi les risques de black-out.

En résumé, au-delà de l'effort scientifique de développer la surveillance et la modélisation afin de pouvoir donner une meilleure alerte, ce sont surtout les producteurs de systèmes et les fournisseurs de services qui sont impliqués.

chapitre 3

Les débris spatiaux : l'insouciance humaine

DE QUOI S'AGIT-IL ?

Cette menace n'existerait pas si l'être humain n'avait pas mis en orbite autour de la Terre des objets de sa création. Le lancement de Sputnik 1 par l'Union Soviétique le 4 octobre 1957 a ouvert l'Espace à l'activité humaine avec d'immenses bénéfices, mais aussi l'apparition d'une nouvelle menace liée à la présence de débris incontrôlés. Il y a accumulation en orbite terrestre de débris variant en taille de l'éclat de peinture à des étages entiers de lanceurs et à des satellites incontrôlés de plusieurs tonnes. Cela correspond à plus d'un demi-million d'objets entre 1 cm et 10 cm et plus de 20 000 objets de plus de 10 cm. Un jour, qui n'est pas tellement lointain, même la Station spatiale internationale arrivée en fin de vie, pour éviter qu'elle devienne un débris spatial particulièrement significatif, devra être désorbitée et rentrer dans l'atmosphère terrestre **(fig. 11 et 12)**.



fig. 11 — Modélisation numérique des débris spaciaux gravitant autour de la Terre, d'après le documentaire Space Junk 3D.



fig. 12 — La Terre, entourée de débris spaciaux.

Crédit : European Space Operations Centre

La menace de collision dans l'Espace entre satellites errants et ceux sous contrôle est particulièrement préoccupante. Par exemple, en février 2009, la collision entre un satellite commercial Iridium en activité et Cosmos 2251, un satellite inopérant depuis 1995, a généré 1 075 (382 + 693) débris décelés, créant une menace d'impact sur la Station spatiale internationale et sur les astronautes en activité extravéhiculaire. Le film américain *Gravity* a exploité le thème de cette dernière menace de façon spectaculaire. Ainsi, l'arithmétique en matière de débris spatiaux est très particulière : 1 + 1 = 1 075. La destruction volontaire par les militaires chinois en 2007 du satellite de météorologie chinois FY-1C (750 kg) à des fins d'essai d'un système de missiles antisatellites a ajouté 150 000 débris de plus de 1 cm au nombre existant.

Le problème devient aigu et le nombre croissant de satellites en fin de vie devenus incontrôlables, renforce cette acuité. Selon un rapport de l'*US National Research Council* paru en février 2013, la communauté spatiale a sans doute atteint le point de non-retour. Une étude de la NASA menée en 2005 a montré que même si, à partir du 1er janvier 2006, on ne lançait plus rien dans l'Espace, le nombre existant de débris spatiaux serait suffisant pour maintenir ou accroître le nombre de collisions, ce qui créerait toujours plus de débris, bien au-delà de ce que les forces naturelles seraient capables d'éliminer. C'est ce qu'il convient d'appeler le syndrome de Kessler, démontrant clairement que l'homme doit intervenir rapidement **(fig. 13)**.

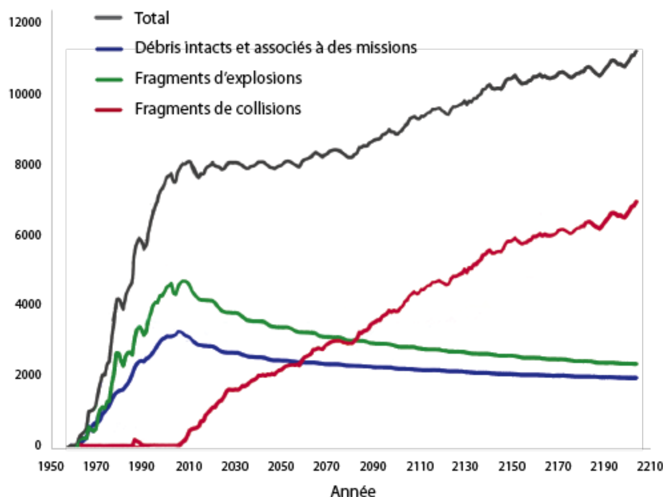


fig. 12 — La Terre, entourée de débris spaciaux.

Crédit : European Space Operations Centre

Deux types de menace sont à prendre en compte :

- D'une part, ces débris peuvent causer, lors de collisions, des perforations significatives dans les vaisseaux spatiaux habités, menaçant la vie des astronautes ; ils peuvent aussi conduire à la destruction de satellites d'importance essentielle pour l'activité humaine (météorologie, positionnement, communications) ou, pour le moins, représentant une valeur scientifique et commerciale élevée ;
- D'autre part, leur rentrée incontrôlée dans l'atmosphère pourrait entraîner au sol la perte de vies humaines ou la destruction de biens collectifs ou individuels. C'est la population de toutes les parties de la Terre qui se trouve ainsi menacée.

Que peut-on faire?

Pour atténuer l'impact de cette menace créée cette fois entièrement par l'être humain, il faut agir sur le plan technologique, mais aussi sur le plan institutionnel et juridique.

1. *Sur le plan technique :*

Deux grandes voies se dessinent : la première est d'éviter la création de nouveaux débris en tentant d'écarter les risques de collision entre objets déjà en orbite, tandis que la seconde est d'assurer le nettoyage de l'espace en éliminant autant que possible les débris existants en forçant si nécessaire leur rentrée dans l'atmosphère.

Pour la première voie, à savoir éviter les collisions en orbite, il s'agit d'instaurer un véritable contrôle de trafic spatial, à l'instar de ce qui existe pour le secteur aérien, en améliorant les réseaux de surveillance des satellites en orbite et en renforçant le contact avec les différents propriétaires pour les avertir du risque d'une collision et ainsi leur permettre de conduire des manœuvres coordonnées d'évitement. L'organisation privée *Space Data Association (SDA)*, regroupant de grands opérateurs de satellites comme Intelsat, Eutelsat, Inmarsat et SES, effectue ce type de veille. Il en est de même du *Joint Space Operations Center (JSpOC)* dépendant du département de la Défense des États-Unis : ce centre aux finalités duales, civiles et militaires, effectue de l'ordre de 400 000 observations chaque jour en

utilisant des radars et des télescopes optiques, permettant de suivre plus de 16 000 objets en orbite autour de la Terre. 5 % de ces objets sont des satellites en fonctionnement, 8 % sont des restes de fusées et les 87 % restants sont constitués par des satellites inactifs et autres débris. Il faut noter aussi la contribution d'un réseau ayant recours à des moyens purement optiques, le réseau ISON établi à l'initiative de l'Institut Keldysh de Mathématiques appliquées de l'Académie des Sciences de la Fédération de Russie. Assurer la coordination de la diffusion de l'information à partir des divers réseaux de surveillance constitue sans doute l'objectif à se fixer pour renforcer cette voie.

En ce qui concerne la seconde voie, celle du nettoyage conduisant à une rentrée contrôlée dans l'atmosphère, à nouveau la surveillance joue un rôle de premier plan. Le centre JSpOC annonce qu'il est capable de prédire une réentrée 2 heures avant que l'événement ne se produise, avec une précision de l'ordre de 30 minutes, ce qui correspond pour des orbites quasi circulaires à une zone d'impact de plus de 10 000 km d'étendue. L'imprécision provient certes de facteurs encore mal connus affectant la réentrée elle-même, mais aussi des limites du système de surveillance, la plupart des stations d'observation au sol étant situées dans l'hémisphère Nord, empêchant toute couverture continue de l'orbite de l'objet en voie de réentrée. Pour le réseau ISON, la grande majorité des observatoires sont également situés dans l'hémisphère Nord, ce qui plaide en faveur du renforcement d'une présence de moyens de surveillance dans l'hémisphère Sud. Au-delà de la surveillance, il faut améliorer les modèles de calcul de la réentrée dans l'atmosphère, toujours frappés d'incertitude. Cela passe par un renforcement des bases de données expérimentales, notamment par une meilleure connaissance des caractéristiques aérodynamiques des couches relativement basses de l'atmosphère traversées lors de la réentrée. Il s'agit d'une zone relativement peu explorée, la densité de l'atmosphère réduisant le temps de vie des satellites expérimentaux qui s'y aventurent. La mise en orbite prochaine de nanosatellites au prix limité et au faible coût de lancement devrait permettre de remédier à cette situation **(fig. 14)**.

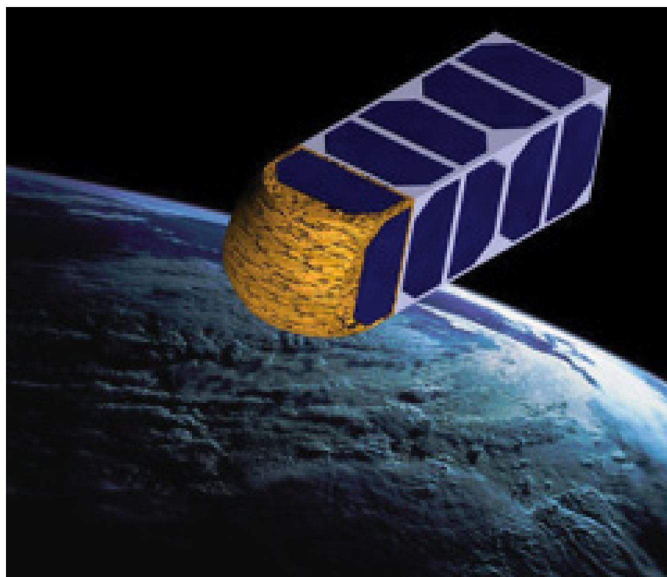


fig. 14 — Un nanosatellite étudiant la réentrée : Qarman, de l'Institut von Kármán.

Crédit : Institut von Kármán

Le cas récent du satellite UARS (*Upper Atmosphere Research Satellite*) illustre en quelques chiffres le problème traité ici. Il s'agissait d'un satellite de recherche de taille importante, 6,5 tonnes, lancé par la navette spatiale en 1991 et mis hors service en décembre 2005. Ce satellite est rentré de manière incontrôlée dans l'atmosphère le 24 septembre 2011, les débris non consumés finissant dans une zone isolée de l'océan Pacifique. Il a été estimé par la NASA qu'environ 28 pièces du satellite (titane, béryllium, aciers spéciaux) pesant ensemble environ 550 kg ont terminé leur course dans l'océan. La probabilité de toucher un être humain avait été évaluée à 3 10exp-4. Le choix de matériaux constitutifs des satellites encore à lancer, brûlant plus aisément lors de la réentrée, et créant moins de pollution s'il s'agit d'ergols liquides, est hautement souhaitable. Par ailleurs, la voie du contrôle de la réentrée, si technologiquement réalisable, s'avère donc fondée au vu de ces chiffres **(fig. 15)**.



fig. 15

Crédit : Michael Carroll

Il faut, comme au basket-ball, envoyer le ballon dans le bon panier. Ce panier est constitué par la zone centre de l'océan Pacifique, s'inscrivant dans le trapèze formé par Hawaii et les îles Marshall au nord et par les îles Salomon et la Polynésie française au sud, vu l'absence de terres habitées, quelques récifs et atolls tout au plus. La désorbitation le 23 mars 2001 de la station MIR, le plus grand objet mis en orbite par l'homme avant l'assemblage de la Station spatiale

internationale, a constitué un cas d'école : dans ce cas particulier, la zone de débris théorique s'étendait sur une ovale large de 200 km et longue de 6 000 km, En dépit de beaucoup de scepticisme, la rentrée se passa sans encombre, les débris non brûlés tombant dans l'océan à 125 km du point d'impact prévu. Des quelques 130 tonnes de la station, environ 20 tonnes finirent dans la mer, le reste provoquant un feu d'artifice dans l'atmosphère sous les yeux des habitants des îles Fiji. Cette opération a démontré l'expertise et l'habilité des contrôleurs au sol de l'Agence spatiale russe et a vérifié que lorsque les paramètres de la réentrée sont bien maîtrisés, la sécurité de l'opération peut être assurée. Lorsque cette maîtrise manque, et c'est encore le cas pour bien des engins spatiaux, cela devient une question de probabilité dont il faut réduire l'importance par tous les moyens disponibles **(fig. 16)**.



fig. 16 — Entrée de la station MIR dans l'atmosphère, le 23 mars 2001.

Crédit : Reuters

Pour le désorbitage proprement dit, la taille des débris conduit à recourir à des technologies différentes. Pour ceux de faible taille, on peut tenter de les désorbiter en vaporisant avec un laser à partir du sol une partie de leur surface, l'ablation ainsi réalisée modifiant leur vitesse orbitale. Le LODR (*Laser Orbital Debris Removal*) a été étudié dans plusieurs cas, la précision de pointage et le niveau de puissance requis sont accessibles technologiquement. Des lasers pulsés de puissance inférieure à 75 kW suffisent pour vaporiser en une seule passe orbitale des objets jusqu'à 10 cm de diamètre. Si l'on tolère une

vaporisation en plusieurs passes, des puissances ne dépassant pas 10 kW suffiraient même pour des objets plus grands (80 cm) et de poids déjà significatif (5 kg) ; c'est le cas du capuchon d'objectif éjecté du télescope optique japonais Araki qui orbite à 700 km d'altitude. La réticence à l'utilisation de lasers depuis le sol n'est pas tellement technologique ou économique, mais bien liée aux abus potentiels qu'elle pourrait générer au travers d'applications militaires.

Pour les débris plus importants en taille, il s'agit de les mettre sous contrôle avant de les faire rentrer de manière sûre dans l'atmosphère. Ceci requiert le développement d'une panoplie de technologies :

- Des mécanismes de déploiement de grappins rigides ou de filets de capture, les dispositifs accrocheurs assurant ensuite la réentrée au bon endroit. La robotique est d'importance prioritaire dans ce domaine vu le caractère non-coopératif de l'objet à agripper. Un exemple de ce système est fourni par le projet de nanosatellite (30 cm x 10 cm x 10 cm) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, *CleanSpace One*, qui devrait en 2016-2017 capturer des satellites de faible taille au moyen d'une main bionique **(fig. 17)** ;
- Des dispositifs accroissant la traînée spatiale et accélérant par conséquent la réentrée du débris : il s'agit de mousse expansible formant un volume supplémentaire autour de l'objet en question, du déploiement sur le débris d'une voile solaire ou encore le déploiement depuis le débris d'un ruban conducteur qui, traversant les lignes du champ magnétique terrestre, assure un freinage électrodynamique. Tous ces dispositifs destinés à être testés en utilisant des nanosatellites, sont de masse et de volume réduits : un ruban de 100 m de type nanoTerminator pèse 56 g et tient dans un volume limité: moins de 4 cm de diamètre pour une longueur de moins de 6 cm. Une voile solaire dépliable de 25 m^2 pèse moins de 3 kg et peut être stockée dans un nanosatellite de 30 cm x 10 cm x 10 cm.

1. *Sur le plan juridique :*



fig. 17

Crédit : EPFL / Emmanuel Barraud / Mediacom

Une perception précoce du problème a conduit à la création dès 1993 d'un *Inter-Agency Debris Committee* formulant en 1994 des lignes directrices pour une action appropriée en 1994. Les propositions qui y sont contenues ont été reprises par l'Union européenne dans un code de conduite répondant au Principe de Précaution, code impliquant la déclaration de tout lancement, la démonstration d'un meilleur

contrôle des satellites en orbite, la désignation d'un responsable « Débris spatiaux » au sein de l'organisme responsable du lancement et la désorbitation du satellite après 25 ans. Cette initiative a stimulé l'adoption en décembre 2007 de *Guidelines* du Comité des Nations unies pour l'Utilisation pacifique de l'Espace extra-terrestre (COPUOS). Ces *Guidelines* sont non contraignantes sur le plan juridique et destinées à être appliquées sur une base volontaire.

Seule la France a traduit ces lignes directrices en loi datant de juin 2008 avec des arrêtés d'application consécutifs. Le plus récent est l'« Arrêté du 31 mars 2011 relatif à la réglementation technique en application du décret n° 2009-643 du 9 juin 2009 relatif aux autorisations délivrées en application de la loi n° 2008-518 du 3 juin 2008 relative aux opérations spatiales ». Ce cadre contraignant favorise la solution du problème au niveau national, mais qu'en est-il sur le plan international ? Une nouvelle version du code de l'Union européenne est sur la table des Nations unies : elle rencontre l'opposition hostile, voire farouche, de certains États membres, justifiée non pas par des considérations économiques, mais bien par la volonté chez d'aucuns de maintenir la porte ouverte à la militarisation de l'Espace. La meilleure solution dans de telles circonstances est de promouvoir une application sur une base volontaire du modèle français et de s'en donner les moyens technologiques.

La gouvernance du risque

La situation est très différente des cas précédents. La menace est devenue un véritable danger où il est n'est plus question de faible probabilité mais de certitude, sans inconnue sur l'acuité du problème. Il ne s'agit pas d'appliquer le Principe de Précaution dans l'attente d'une meilleure connaissance de la menace, mais de formuler des plans d'action concrets visant à éliminer ou du moins à réduire le danger.

chapitre 4

La Géo-Ingénierie : une solution très risquée

Cette menace reste pour le moment potentielle et elle ne se préciserait que si l'attitude de la Société à son égard évoluait dans un sens qui lui serait favorable.

Le concept dérive du souci de contrer le réchauffement de la planète en utilisant des moyens technologiques pour modifier les facteurs gouvernant le climat. Deux objectifs sont en particulier retenus :

- Stimuler l'absorption de CO^2 par l'océan en y déversant des composés chimiques tels que le Fer qui favorisent le développement de plancton fixant le CO^2. Ce procédé a été expérimenté sur une partie limitée d'océan avec des résultats peu convaincants ;
- Modifier le bilan solaire de notre planète en accroissant la quantité d'énergie réfléchie par l'atmosphère grâce à la dispersion dans celle-ci de particules réfléchissantes, comme des composés de soufre étant considérés pour cette application. Au niveau de la physique des phénomènes, le mécanisme de réflexion de l'énergie solaire incidente par des aérosols ou des poussières ne fait aucun doute et les considérations théoriques ont fait l'objet d'une vérification expérimentale en grandeur réel, lors de l'éruption du volcan Pinatubo en juin 1991 aux Philippines, qui relâcha dans l'atmosphère environ 20 millions de tonne de SO^2 ; l'émission d'aérosols conduisit à une baisse de la température moyenne de surface de l'ordre de 0,5 °C pendant 2 ans.

Sur le plan scientifique, seule la géo-ingénierie visant à modifier le bilan solaire est à prendre en considération. Les promoteurs de cette approche considèrent que la Société a la responsabilité de trouver une solution aux problèmes qu'elle a elle-même créés, en ayant recours à de nouvelles technologies qu'ils estiment en vue, impliquant de manière sinon constante, du moins à grande fréquence, l'envoi de flottes d'avions ou de fusées dans la haute atmosphère pour disperser

les particules réfléchissantes. Même si la faisabilité technologique était établie, quel en serait le coût ? Si pour une raison quelconque, l'opération de dispersion devait être interrompue, l'augmentation de température de la surface de la Terre serait brutale, une question de semaines ou de mois plutôt que de décennies, avec un effet dévastateur sur les écosystèmes. Par ailleurs, une modification brusque du bilan solaire ne conduirait-elle pas à plus d'événements météorologiques extrêmes tels que sécheresses ou ouragans ? Mais l'interrogation principale se situe au niveau social et institutionnel : qui aurait le contrôle du thermostat de la Planète ? Pourrait-on jamais atteindre un consensus au niveau mondial pour mettre en œuvre la géo-ingénierie alors même que la controverse continue sur la question même du réchauffement climatique ? Qu'arriverait-il si la méthode était appliquée unilatéralement par un État ? Autant de questions qui nous dictent de laisser la géo-ingénierie au stade de la réflexion. Sans jeter l'anathème sur ceux qui y voient un plan de substitution dans le cas où les efforts internationaux actuels n'aboutissaient pas, la sagesse invite à la considérer davantage comme une menace que comme une solution.

Conclusion

Nous nous trouvons en face de menaces qui présentent divers degrés de risque et qui sont généralement peu connues de la Société, sauf à travers de mauvais scénarios de science-fiction. Faut-il redouter l'arrivée du « cygne noir », un événement au-delà de toute attente mais d'importance majeure, tel qu'évoqué par Nassim Nicholas Taleb dans son livre *Fooled by Randomness*, publié en 2001 ? Cela ne devrait pas être le cas, même si certaines caractéristiques propres au « cygne noir » se retrouvent dans les menaces venant de l'Espace : impact extrême et très faible probabilité, à la limite de ce qui peut être quantifié. Même si de telles menaces sont peu perçues par le grand public, elles sont surveillées par la communauté scientifique, ce qui enlève le caractère inattendu du « cygne noir ».

Ce qu'il faut noter, pour les risques d'origine naturelle, astéroïdes et tempêtes solaires, c'est que la menace grandit en raison d'une démographie galopante et d'une vulnérabilité croissante de nos infrastructures. La solution se trouve avant tout dans un développement bien orienté de la Science et de la Technologie, appuyé par un cadre institutionnel adéquat.

Pour les risques d'origine anthropogénique, le problème des débris est bien perçu au niveau des responsables des systèmes spatiaux, mais aussi chez certains décideurs politiques ; des solutions sont mises en œuvre dès à présent et il devrait faire l'objet d'une attention accrue dans les années à venir. Quant à la géo-ingénierie, la sagesse dicte de la garder loin d'une mise en œuvre pratique.

Dans tous les cas, c'est l'homme qui est au cœur du problème mais aussi au cœur de la solution. Entre l'inaction et la panique, il y un juste milieu ; les menaces évoquées dans l'ouvrage ne peuvent être ignorées. Ne rien faire serait peu judicieux - l'inaction, c'est comme la traînée aérodynamique, cela peut conduire à la destruction - mais agir exige, outre une sérieuse motivation politique, une forte base scientifique et technologique. Des communautés spécifiques s'y consacrent, contribuant ainsi à renforcer notre capacité d'innovation.

Le mot de la fin sera laissé à Winston Churchill pour qui : « Difficulties mastered are opportunities won. »

à propos des références

Plutôt qu'établir une longue liste de références, il a paru préférable de conseiller au lecteur de se diriger sur la toile s'il souhaite approfondir

l’un ou l’autre sujet. La richesse de la documentation atteignable avec les moteurs de recherche actuels est immense ; il est particulièrement recommandé de consulter les pages des grandes organisations de recherche spatiale qui partout sur notre Planète cherchent à répondre aux défis posés par les menaces venant de l’Espace.

Bibliographie

T.E. Bell, « The grand Analogy : history of the idea of extraterrestrial life », in , issue 5, vol. 2 #1, 1980, p. 2.

J. Bennett, G.S. Shostak & B. Jakosky, , San Francisco, Benjamin-Cummings, 2002.

B. Bilodeau & F. Raulin-Cerceau, « Communiquer avec les planètes », in , vol. 121, 2007, p. 286.

M. Brake, « On the plurality of inhabited worlds : a brief history of extraterrestrialism », in , vol. 5#2, 2006, p. 99.

, D.A. Rothery, I. Gilmour, M.A. Sephton (eds), Cambridge, Cambridge University Press, 2011.

C.J. Corbally, « Thomas Digges & Giordano Bruno : 400 years of pluralité of worlds », American Astronomical Society, 194**th** AAS Meeting, #25.01, in , vol. 31, 1999, p. 863.

M.J. Crowe, « A history of the extraterrestrial life debate », in , vol. 32#2, 1997, p. 147.

S.J. Dick, , Cambridge, Cambridge University Press, 1996.

D. Fossé, « ET prend son temps », in , vol. 444, 2007, p. 60.

B.S. Gaudi, « Microlensing surveys for exoplanets », in ., vol. 50, 2012, p. 411-453.

M.I. George, « The Catholic faith, scripture and the question of the existence of intelligent extraterrestrial life », in st , A. Ramos & M.I. George (eds), 2002, p. 135.

Y. Nazé, « Une course aux limites des télescopes – étudier en détail une exoplanète », in , vol. 487, décembre 2010, p. 45-48.

E. Piotelat, « Une chronologie de SETI », in , vol. 121, 2007, p. 294.

D. Proust et J. Schneider, , Paris, Science ouverte, Seuil, 2007.

S. Seager & D. Deming, « Exoplanet atmospheres », in , vol. 48, 2010, p. 631.

G. Tanzella-Nitti, « Extraterrestrial life », in , 2008.

V. Trimble, « The quest for other worlds, 350 BCE to 1995 CE », in CP713 , S.S. Holt et D. Deming (eds), 2004, p. 3.

S. Udry & N.C. Santos, , in , vol. 45, 2007, p. 397.

J.N. Winn, « Transits and occultations », in , S. Seager (ed.), Tucson (AZ), University of Arizona Press, 2011.

J.T. Wright & B.S. Gaudi, « Exoplanet detection methods », in , New York, Springer, 2013

B. Zimmerman, « The plurality of worlds : 19th century theories of extraterrestrials », in , vol. 97, 2003, p. 158.

L'auteur

Ingénieur et physicien nucléaire, Jean-Pierre Contzen est actuellement Président de l'Institut von Kármán de Dynamique des Fluides et Président de la Fondation Scientifique Nansen de Saint Pétersbourg. Au cours de sa carrière consacrée à la recherche et à la gestion de la science & technologie, il s'est toujours intéressé à la problématique du risque et à la relation entre développement technologique et maintien d'une société sûre dans un monde globalisé. Il est membre de la Classe Technologie et Société de l'Académie royale de Belgique et correspondant étranger de l'Académie des Sciences du Portugal.



ACADÉMIE ROYALE
des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts
DE BELGIQUE ÉDITIONS

Retrouvez le catalogue complet des publications de l'Académie royale de Belgique sur :

www.academie-editions.be